

## Методики создания и проверки многодиапазонных антенно-волноводных трактов

С.И. Бойчук<sup>1</sup>, А.Е. Коровкин<sup>1</sup>, В.И. Юхнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»  
344038, Россия, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Нансена, 130

<sup>2</sup> Северо-Кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики  
344002, Россия, г. Ростов-на-Дону,  
ул. Серафимовича, 62

**Аннотация – Обоснование.** Необходимость создания, сборки и настройки антенно-волноводных трактов многодиапазонных зеркальных антенн систем спутниковой связи требует использования различных методик выбора структуры, определения и оптимизации параметров антенно-волноводных трактов. **Цель.** Снижение требований к объемам вычислительных затрат при разработке антенно-волноводных трактов и временных затрат на их сборку и настройку, а также проведение анализа изменения характеристик антенно-волноводных трактов при изменении параметров одного из устройств в составе тракта на основе выполнения расчетов характеристик только данного устройства. **Методы.** Разработка антенно-волноводных трактов, включающая этапы выбора схемы построения тракта и определение параметров входящих в его состав устройств, проводится на основе математической модели соответствующего варианта построения тракта с использованием методов пакетов электродинамического моделирования. **Результаты.** Разработана методика создания многодиапазонного антенно-волноводного тракта и методики его сборки и настройки. **Заключение.** Предложена методика, которая позволяет снизить требования к используемым вычислительным средствам при разработке антенно-волноводных трактов по объему оперативной памяти, быстродействию. Реализована возможность анализа изменения характеристик антенно-волноводных трактов при изменении параметров одного из устройств в составе антенно-волноводных трактов на основе проведения расчетов характеристик только данного устройства. Последовательное выполнение измерений характеристик фрагмента антенно-волноводного тракта на этапе сборки и настройки дает возможность принимать решение о дальнейшей сборке антенно-волноводного тракта или внесении изменений в параметры последнего из подключенных устройств.

**Ключевые слова** – антенно-волноводный тракт; многодиапазонная зеркальная антенна; структура и характеристики антенно-волноводных трактов.

### Введение

В современных наземных станциях систем спутниковой связи используются зеркальные антенны, обеспечивающие прием в нескольких частотных диапазонах с целью непрерывного обеспечения трафика пользователей в различных регионах Земного шара. Широкое использование при решении указанных задач могут находить многодиапазонные антенны различных типов, в первую очередь зеркальные антенны. В настоящее время известен ряд технических решений по построению антенн земных станций спутниковой связи [1–4].

В зависимости от решаемых многодиапазонных зеркальных антенн (МЗА), требований к диапазонам частот и видам поляризаций принимаемых и передаваемых сигналов могут использоваться антенно-волноводные тракты (АВТ), построенные на основе одного из следующих способов:

– способ разделения сигналов по частоте-поляризации;

– способ разделения сигналов по поляризации-частоте.

Наиболее широкое распространение при построении МЗА получил первый из указанных способов. Для минимизации затрат, связанных с созданием и последующей эксплуатацией таких комплексов, наиболее актуальным является использование МЗА, построенных на основе многодиапазонных АВТ [5; 6]. Однако разработка, создание и последующая настройка таких антенн и трактов, несмотря на их анализ в ряде работ [7–11], является трудоемкой задачей, требующей как большого объема вычислений, так и больших временных затрат на сборку и настройку устройств и элементов, входящих в состав АВТ.

Целью статьи является снижение требований, к объемам вычислительных затрат при разработке АВТ и временных затрат на их сборку и настройку, а также проведение анализа изменения характеристик АВТ при изменении параметров одного из устройств в составе АВТ на основе про-

ведения расчетов характеристик только данного устройства.

Решаемые задачи.

1. Разработка методики создания многодиапазонного АВТ.

2. Разработка методики сборки и настройки АВТ.

## Исследование

Структурная схема трехдиапазонного АВТ с функцией автосопроводения, разработанного на основе способа разделения принимаемых сигналов по частоте-поляризации, приведена на рис. 1.

Разработка АВТ, включающая этапы выбора схемы построения тракта и определение параметров входящих в его состав устройств, проводится на основе математической модели соответствующего варианта построения тракта [12]. По результатам моделирования диплексеров могут быть сформированы матрицы  ${}^{(j)}\mathbf{A}$  и  ${}^{(j)}\mathbf{A}$  для  $j$ -го из числа совмещаемых частотных диапазонов ( $j = 1, \dots, J - 1$ ), определяющие взаимосвязь между модами сигнала на входе диплексера и модами сигналов на первом и втором выходе соответственно.

Аналогично для поляризаторов и селекторов поляризационных  $j$ -го частотного диапазона ( $j = 1, \dots, J$ ) по результатам моделирования могут быть получены, соответственно, матрицы  ${}^{(j)}\mathbf{B}_1$  и  ${}^{(j)}\mathbf{B}_2$ , с использованием которых формируется матрица  ${}^{(j)}\mathbf{B} = {}^{(j)}\mathbf{B}_2 \cdot {}^{(j)}\mathbf{B}_1$ .

Для устройств отбора высшей моды рассчитываются матрицы  ${}^{(j)}\mathbf{C}$  и  ${}^{(j)}\mathbf{C}$  для диапазонов частот, в которых осуществляется автосопроводение излучающего КО.

Далее с использованием рассчитанных матриц определяются потери и КСВн в каждом из совмещаемых диапазонов частот. На основании указанных характеристик рассчитывается значение показателя эффективности АВТ.

Выбранный способ разделения сигналов может быть реализован с использованием в составе АВТ ответвителей моды, диплексеров, поляризаторов и селекторов. Выбор параметров устройств в составе АВТ проводится с учетом взаимосвязи параметров устройств и характеристик АВТ с использованием разработанной математической модели АВТ, которая может быть получена на основе матриц, представляющих полноволновое описание сигналов в элементах АВТ [12].

Блок-схема предлагаемой методики приведена на рис. 2. На первом этапе в соответствии с задан-

ном числом совмещаемых диапазонов, шириной полосы рабочих частот в каждом из совмещаемых диапазонов, набором поляризаций принимаемых сигналов, необходимостью выполнения автосопроводения источника радиоизлучения выполняется выбор структуры АВТ.

На втором этапе производится выбор конструкции и предварительный выбор параметров элементов из состава АВТ. При построении в соответствии со способом разделение по частоте-поляризации будут использоваться частотные диплексеры. Выбор конструкции осуществляется с учетом габаритных ограничений. В частности, указанные ограничения определяют выбор конструкций частотных диплексеров. При построении АВТ по способу разделение по поляризации-частоте используется диплексер.

На следующем этапе проводится уточнение параметров элементов АВТ, обеспечивающих получение заданных характеристик. При выполнении этого этапа последовательно, начиная с входного элемента АВТ, формируются фрагменты АВТ для случая двухдиапазонного АВТ с совмещением S- и X-диапазонов частот с автосопроводением в X-диапазоне и выделением в каждом из совмещаемых диапазонов сигналов правой и левой круговых поляризаций.

Вход АВТ (диплексер) подключается к выходу облучателя. Предварительный выбор параметров диплексеров осуществляется с учетом согласования их входных характеристик с выходными характеристиками облучателя МЗА. Сечение волновода на входе АВТ без реализации автосопроводения выбирается из условия распространения основной моды в нижнем частотном диапазоне и минимального числа распространяющихся мод в верхнем из совмещаемых частотных диапазонов. Кроме того, учитывается зависимость выходных характеристик рупорного облучателя в совмещаемых диапазонах частот от диаметра модового трансформатора рупора.

К выходу диплексера, соответствующему первому частотному диапазону, подключается однодиапазонное устройство поляризационного преобразования и селекции, выбор параметров которого не представляет сложностей.

Ко второму выходу первого частотного диплексера подключается второй частотный диплексер. Входное сечение волновода данного диплексера выбирается из условия распространения основной моды во втором частотном диапазоне и минимального числа распространяющихся мод в верх-

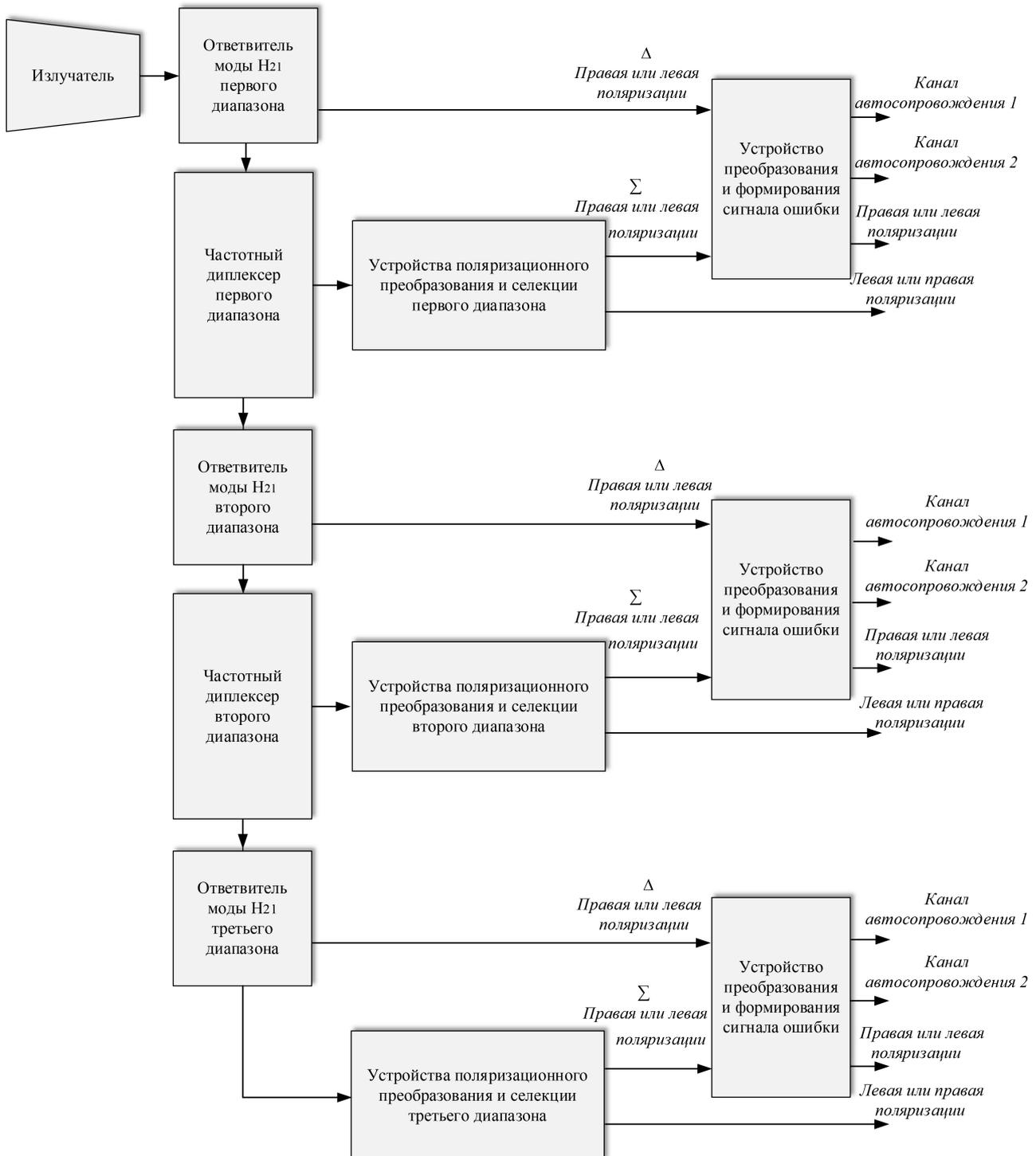


Рис. 1. Структурная схема трехдиапазонного АВТ с автосопровождением  
Fig. 1. Structural diagram of a three-band AVT with auto-tracking

нем из совмещаемых частотных диапазонов. Ко второму выходу второго диплексера подключается однодиапазонное устройство поляризационного преобразования и селекции, выбор параметров которого, как и для нижнего частотного диапазона, не представляет сложностей. Оптимизация параметров диплексеров других диапазонов частот проводится аналогично.

В случае построения АВТ по схеме разделение по поляризации-частоте с выходными характеристиками облучателя согласуются входные характеристики устройства поляризационного разделения. Выбор размеров волноводов осуществляется аналогично, как и в предыдущей схеме.

Достоинствами предлагаемой методики являются:

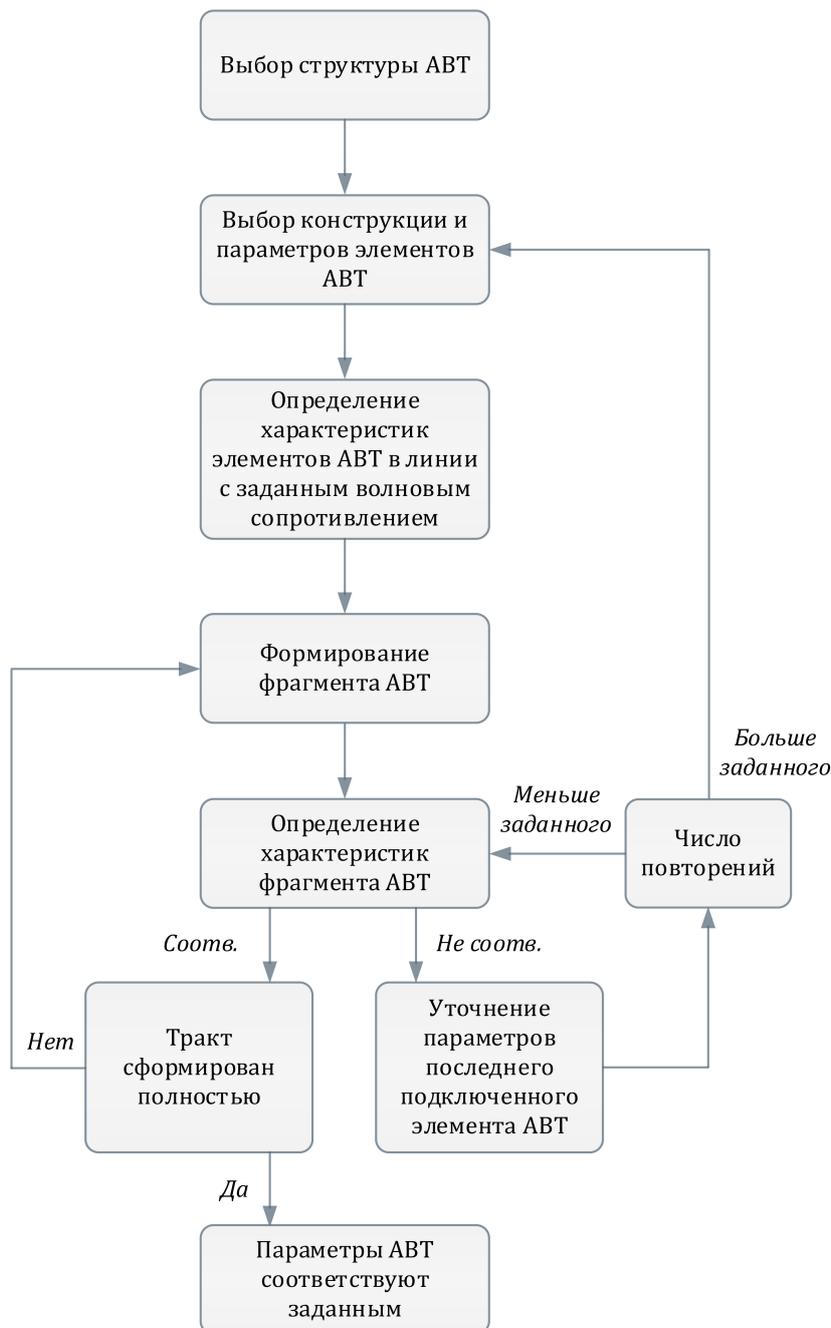


Рис. 2. Блок-схема методики разработки АВТ  
Fig. 2. Flowchart of the AVT development methodology

– возможность снижения требований к используемым вычислительным средствам при разработке АВТ по объему оперативной памяти, быстродействию;

– возможность анализа изменения характеристик АВТ при изменении параметров одного из устройств в составе АВТ на основе проведения расчетов характеристик только данного устройства.

Вторым направлением использования разработанной математической модели является разработка методики контроля и настройки ха-

рактеристик АВТ при сборке. Использование математической модели в этом случае позволяет:

– проводить анализ соответствия характеристик изготовленных составных частей заданным требованиям;

– в течение сборки АВТ при последовательном подключении каждого из устройств проводят анализ характеристик собранной части АВТ, сопоставление его с расчетными значениями и настройку параметров устройства;

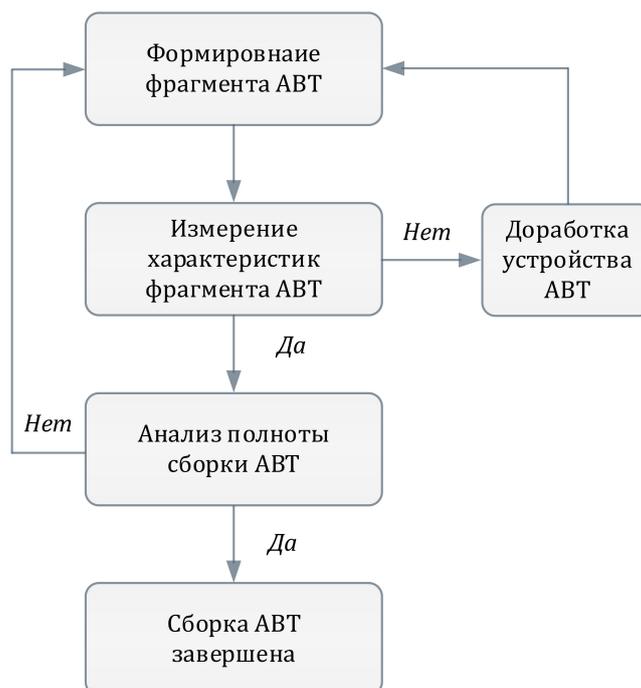


Рис. 3. Блок-схема методики настройки АВТ  
Fig. 3. Block diagram of the AVT tuning technique

– по результатам анализа измеренных значений, выполняемом последовательно на этапе сборки, принимать решение о дальнейшей сборке АВТ или внесении изменений в параметры последнего из подключенных устройств.

Соответствующая блок-схема методики приведена на рис. 3.

На первом этапе проводится последовательная сборка фрагментов АВТ. Первым фрагментом АВТ является входное устройство АВТ, которым в зависимости от выбранной схемы построения могут являться частотные диплексеры, ответвители высшей моды или устройства поляризационного преобразования и селекции.

На втором этапе – измерение характеристик первого устройства в составе АВТ. По результатам сопоставления расчетных и измеренных характеристик АВТ проводится настройка параметров подключаемого элемента АВТ.

Достоинства предлагаемой методики являются:

- возможность снижения требований к используемым вычислительным средствам при разработке АВТ по объему оперативной памяти, быстродействию;
- возможность анализа изменения характеристик АВТ при изменении параметров одного из устройств в составе АВТ на основе проведения расчетов характеристик только данного устройства.

## Заключение

Анализ прикладных аспектов использования математической модели АВТ МЗА позволил выделить два направления применения данной модели при создании АВТ:

- построение методики, обеспечивающей выбор структуры АВТ, определение и оптимизацию параметров составных частей выбранной структуры;

- построение методики контроля и настройки параметров АВТ в ходе его сборки.

В рамках первого направления, связанного с выбором структуры АВТ МЗА, определением и оптимизацией параметров составных частей выбранной структуры, использование данной методики позволяет:

- снизить требования к используемым вычислительным средствам при разработке АВТ;

- проводить анализ изменения характеристик АВТ при изменении параметров одного из устройств в составе АВТ при проведении расчетов характеристик только данного устройства.

Вторым направлением применения разработанной математической модели является разработка методики контроля и настройки характеристик АВТ при сборке. Использование математической модели в этом случае позволяет:

- проводить анализ соответствия характеристик изготовленных составных частей заданным требованиям;

– в течение сборки АВТ при последовательном подключении каждого из устройств проводить анализ характеристик собранной части АВТ, сопоставление его с расчетными значениями и настройку параметров устройства;

– по результатам анализа измеренных значений, выполняемом последовательно на этапе сборки, принимать решение о дальнейшей сборке АВТ или внесении изменений в параметры последнего из подключенных устройств.

### Список литературы

1. Демченко В.И., Косогор А.А., Раздоркин Д.Я. Методология разработки многодиапазонных зеркальных антенн // Антенны. 2012. Вып. 9 (184). С. 4–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18052444>
2. Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Раздоркин Д.Я. Практическая реализация многодиапазонных зеркальных антенн связи с ИСЗ на геостационарных, высокоэллиптических и круговых орбитах // Радиотехника. 2014. № 8. С. 61–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21845949>
3. Бойчук С.И., Коровкин А.Е., Раздоркин Д.Я. Антенно-волноводные устройства с единым рупором для многодиапазонных антенных систем // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 7 (9). С. 202–208. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41117354>
4. Антенно-волноводные устройства многодиапазонных зеркальных антенн / А.Е. Коровкин [и др.] // Антенны. 2011. Вып. 12 (175). С. 38–41. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17764070>
5. Способы частотно-поляризационного разделения сигналов в зеркальных антеннах систем спутниковой связи / Д.Д. Габриэльян [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 2. С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.83-90>
6. Приемно-передающий облучатель зеркальных антенн систем спутниковой связи / С.И. Бойчук [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9, № 1. С. 73–78. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48109092>
7. Ключев С.Б., Нефедов Е.И. Антенна с явно выраженной продольной составляющей электрического поля в ближней зоне // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 4. С. 21–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12835171>
8. Ключев Д.С. Электродинамический анализ зеркальных антенн методом сингулярных интегральных уравнений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т. 12, № 3. С. 86–90. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12846665>
9. Ключев Д.С. Самосогласованный метод расчета зеркальных антенн // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14, № 4. С. 13–19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17272406>
10. Кирпанев А.В. Исследование широкополосных антенн по измерениям ближних полей в слабоэховой обстановке // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Т. 9, № 2. С. 26–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15138730>
11. Юрцев О.А., Наумович Н.М., Лихачевский Д.В. Ближнее поле и фокусировка зеркальной антенны // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10, № 2. С. 39–45. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13121231>
12. Математическая модель антенно-волноводного тракта с разделением сигналов по частоте-поляризации / Д.Д. Габриэльян [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 41–51. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49491802>

### Информация об авторах

**Бойчук Сергей Игоревич**, руководитель группы Ростовского-на-Дону НИИ радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Россия.  
Область научных интересов: электродинамика, устройства СВЧ, антенны.  
E-mail: [sergey-boy1@yandex.ru](mailto:sergey-boy1@yandex.ru)

**Коровкин Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ростовского-на-Дону НИИ радиосвязи, г. Ростов-на-Дону, Россия.  
Область научных интересов: электродинамика, гофрированные рупора, устройства СВЧ, антенны.  
E-mail: [alkejzer@mail.ru](mailto:alkejzer@mail.ru)

**Юхнов Василий Иванович**, кандидат технических наук, заведующий кафедры «Инфокоммуникационных технологий и систем связи» Московского технического университета связи и информатики (СКФ МТУСИ)  
Область научных интересов: системы связи.  
E-mail: [juchnov@mail.ru](mailto:juchnov@mail.ru)

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2023, vol. 26, no. 3, pp. 52–58

DOI [10.18469/1810-3189.2023.26.3.52-58](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.3.52-58)  
UDC 621.396.677  
Original Research

Received 12 April 2023  
Accepted 15 May 2023  
Published 27 September 2023

### Methods for creating and testing multi-band antenna-waveguide paths

Sergey I. Boychuk<sup>1</sup>, Alexander E. Korovkin<sup>1</sup>, Vasily I. Yuchnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSUE «RNIIRS»

130, Nansen Street,

Rostov-on-Don, 344038, Russia

<sup>2</sup> North-Caucasian branch of the Moscow Technical University of Communications and Informatics

62, Serafimovich Street,

Rostov-on-Don, 344002, Russia

**Abstract – Background.** The need to create, assemble and configure antenna-waveguide paths of multi-band reflector antennas of satellite communication systems requires the use of various methods for choosing the structure, determining and optimizing the parameters of antenna-waveguide paths. **Aim.** Reducing the requirements for the volume of computational costs in the development of antenna-waveguide paths and the time spent on their assembly and configuration, as well as analyzing the change in the characteristics of the antenna-waveguide paths when changing the parameters of one of the devices in the path based on the calculation of the characteristics of only this device. **Methods.** The development of the antenna-waveguide path, which includes the stages of choosing a scheme for constructing a tract and determining the parameters of its constituent devices, is carried out on the basis of a mathematical model of the corresponding variant of constructing a tract using the methods of electrodynamic modeling packages. **Results.** A technique has been developed for creating a multi-band antenna-waveguide path and a technique for its assembling and tuning. **Conclusion.** A technique is proposed that allows to reduce the requirements for the computing tools used in the development of antenna-waveguide paths in terms of the amount of RAM and speed of calculations. Implemented the ability to analyze the change in the characteristics of the antenna-waveguide path when changing the parameters of one of the devices in the composition of the antenna-waveguide path based on the calculation of the characteristics of only this device. Sequential performance of measurements of the characteristics of the antenna-waveguide path fragment at the stage of assembly and configuration makes it possible to make a decision on the further assembly of the antenna-waveguide path or making changes to the parameters of the last of the connected devices.

**Keywords** – antenna-waveguide path; multiband reflector antenna; structure and characteristics of AWP.

✉ alkejzer@mail.ru (Alexander E. Korovkin)

 © Sergey I. Boychuk et al., 2023

## References

1. V. I. Demchenko, A. A. Kosogor, and D. Ya. Razdorkin, “Methodology for the development of multi-band reflector antennas,” *Antenny*, no. 9 (184), pp. 4–18, 2012, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18052444>. (In Russ.)
2. D. D. Gabrielyan, V. I. Demchenko, and D. Ya. Razdorkin, “Practical implementation of multi-band reflector antennas for communication with satellites in geostationary, highly elliptical and circular orbits,” *Radiotekhnika*, no. 8, pp. 61–70, 2014, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21845949>. (In Russ.)
3. S. I. Boychuk, A. E. Korovkin, and D. Ya. Razdorkin, “Antenna-waveguide devices with a single horn for multi-band antenna systems,” *Radiotekhnika*, vol. 83, no. 7 (9), pp. 202–208, 2019, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41117354>. (In Russ.)
4. A. E. Korovkin et al., “Antenna-waveguide devices of multiband reflector antennas,” *Antenny*, no. 12 (175), pp. 38–41, 2011, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17764070>. (In Russ.)
5. D. D. Gabrielyan et al., “Methods for frequency-polarization separation of signals in reflector antennas of satellite communication systems,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 83–90, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.2.83-90>. (In Russ.)
6. S. I. Boychuk et al., “Receiving-transmitting irradiator of mirror antennas of satellite communication systems,” *Raketno-kosmicheskoe priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy*, vol. 9, no. 1, pp. 73–78, 2022, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48109092>. (In Russ.)
7. S. B. Klyuev and E. I. Nefedov, “Antenna with a pronounced longitudinal component of the electric field in the near field,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 21–26, 2008, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12835171>. (In Russ.)
8. D. S. Klyuev, “Electrodynamic analysis of reflector antennas by the method of singular integral equations,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 86–90, 2009, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12846665>. (In Russ.)
9. D. S. Klyuev, “Self-consistent method for calculating reflector antennas,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 13–19, 2011, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17272406>. (In Russ.)
10. A. V. Kirpanev, “Investigation of broadband antennas by measurements of near fields in a weak echo environment,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 26–30, 2006, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15138730>. (In Russ.)
11. O. A. Yurtsev, N. M. Naumovich, and D. V. Likhachevsky, “Near field and reflector antenna focusing,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 39–45, 2007, url: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13121231>. (In Russ.)
12. D. D. Gabrielyan et al., “Mathematical model of an antenna-waveguide path with separation of signals by frequency-polarization,” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*, vol. 25, no. 4, pp. 41–51, 2022, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49491802>. (In Russ.)

## Information about the Authors

**Sergey I. Boychuk**, team leader of FRPC «FSUE “RSRIRC”», Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* electrodynamics, microwave devices, antennas.

*E-mail:* sergey-boy1@yandex.ru

**Alexander E. Korovkin**, Candidate of Engineering Sciences, senior researcher of FRPC «FSUE “RSRIRC”», Rostov-on-Don, Russia.

*Research interests:* electrodynamics, corrugated horns, microwave devices, antennas.

*E-mail:* alkejzer@mail.ru

**Vasily I. Yukhnov**, Candidate of Engineering Sciences, head of department North-Caucasian branch of Labour Red Banner order federal state budgetary educational institution of higher education “Moscow technical university of communications and informatics”.

*Research interests:* communication systems.

*E-mail:* yuchnov@mail.ru